

С 7 1 6 2 7 6 - 1

На правах рукописи

**ТАЗЮКОВ ФАРУК ХОСНУТДИНОВИЧ**

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

**05.14.05 - Теоретические основы теплотехники**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**2000**



0716276-1

На правах рукописи

**ТАЗЮКОВ ФАРУК ХОСНУТДИНОВИЧ**

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

**05.14.05 - Теоретические основы теплотехники**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**Казань -2000**

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
КФУ



0000947728

Работа выполнена в Казанском государственном технологическом университете

Научный консультант: д.т.н., проф. Гарифуллин Ф.А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Даутов Г.Ю.

доктор физ.-мат. наук, профессор Зубков П.Т.

доктор технических наук, профессор Хайруллин М.Х.


Ведущая организация - Научно-технический центр «Вакууммаш», г.Казань

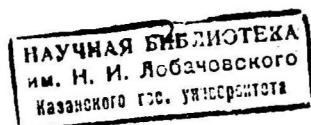
Защита состоится « 7 » июля 2000 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д063.37.02 в Казанском государственном технологическом университете по адресу: 420015, г.Казань, ул. К.Маркса, 68 (зал заседаний Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КГТУ.

Автореферат диссертации разослан "6" июня 2000 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, д.т.н., профессор

 Лаптев А.Г.





## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Одним из важнейших направлений развития химической технологии является совершенствование процессов, протекающих в аппаратах химической промышленности, на основе их моделирования и создание новых элементов аппаратов, улучшающих качество получаемого продукта. Во многих процессах химической технологии (в том числе тепло- и массообменных) в качестве рабочего тела используются межфазные поверхности, являющиеся контактными зонами. Эти приложения включают в себя такие важные технологические процессы, как выращивание кристаллов, процессы пропитки, вытеснение нефти из нефтеносных слоев, смачивание, сушка, процессы покрытия эмульсиями твердых поверхностей, экструзии, разделения фаз, массообменные процессы и многие другие важнейшие процессы, в которых формирующаяся контактная линия играет решающую роль.

### **Актуальность темы**

Важность и актуальность исследований термокапиллярных течений, возникающих вследствие эффекта Марангони для химических технологий связывают со значительными флуктуациями массообменных процессов, возникающих как вследствие изменений величины поверхностного натяжения межфазных границ, так и ее значительными деформациями, увеличивающими поверхность межфазного контакта. В результате, эти изменения приводят к изменению структуры течения жидкости, а в случае течения тонких пленок и к флуктуациям ее толщины.

Исследования носят междотраслевой характер и проведены в соответствии с Координационным планом РАН «Теоретические основы химической технологии» на 1986-2000 гг., НИР отделения Химии и химической технологии АН Татарстана по теме: «Механика реологических сред в каналах сложной геометрии».

### **Цель работы**

Целью работы является исследование конвективных процессов протекающих в аппаратах, в которых межфазная граница играет значительную роль, а линия трехфазного контакта является существенным фактором, влияющим на исследуемые процессы: термокапиллярная миграция капель на неравномерно нагретых стенках паромасляных насосов, формирование струй неньютоновских жидкостей на выходе из

капилляров, и исследование устойчивости струй относительно малых возмущений.

Все эти процессы объединяют наличие межфазной границы, линии трехфазного контакта и наличие термокапиллярной конвекции, возникающей вследствие температурной неоднородности свободной поверхности.

Для достижения сформулированной цели были поставлены следующие задачи:

- проанализировать особенности течения жидкостей в окрестности линии трехфазного контакта, на основе этого анализа выбрать физически корректную модель движения линии контакта;
- разработать математическую модель процесса термокапиллярной миграции капель и пленок на неравномерно нагретых поверхностях;
- определить условия, при которых миграция возможна;
- разработать математическую модель течения неньютоновских жидкостей на выходе из формообразующих насадок экструдеров;
- определить влияние термокапиллярной конвекции на области устойчивости струи относительно малых тепловых и гидродинамических возмущений.

#### **Научная новизна**

Научная новизна и значимость работы состоит в том, что в ней впервые комплексно исследовано влияние термокапиллярной конвекции применительно к некоторым широко распространенным процессам химической технологии, включающим в себя поверхность раздела фаз, динамическую или статическую линию трехфазного контакта.

Автором впервые:

- экспериментально исследовано наличие эффекта термокапиллярной миграции пленок и капель рабочих жидкостей на неизотермических поверхностях паромасляных насосов;
- построена математическая модель термокапиллярной миграции тонких капель на неравномерно нагретых твердых поверхностях;
- проведены экспериментальные исследования эффекта термокапиллярной миграции и выявлены основные факторы, воздействующие на этот процесс; сравнены результаты моделирования с экспериментальными данными;

■ на основании проведенных исследований, разработаны конструкции, предназначенные для предотвращения нежелательной миграции в системах вакуумирования, а также разработан способ очистки оптических поверхностей, по которым получены авторские свидетельства;

■ путем математического моделирования, получены степени расширения в зависимости от неньютоновских характеристик полимерных систем; показано влияние области трехфазного контакта на образование скачков давления и, следовательно, на возможности образования пустот и каверн в получаемых изделиях;

■ исследовано влияние термокапиллярной конвекции на устойчивость жидких струй относительно малых возмущений.

#### **Практическая ценность.**

Результаты работы послужили основой для создания в АО ВАКМА методик расчета миграционной составляющей обратного потока в диффузионных паромасляных насосах.

Результаты работы привели к созданию целого ряда антимиграционных устройств, работающих на использовании эффекта Марангони и разработке методики очистки оптических поверхностей.

Результаты работы послужили основой для создания в ОАО КИФ методик расчета и конструирования плоскощелевых насадок для производства ПЭТФ основы кинофотоматериалов.

#### **Реализация основных положений диссертации**

Основные результаты исследования использованы в следующих организациях.

В АО «Вакууммаш» (г. Казань) для:

■ проектирования и изготовления антимиграционных устройств паромасляных диффузионных насосов;

■ очистки оптических поверхностей; использование предложенной методики привело к уменьшению расхода растворителя и повышению качества очистки поверхности;

В АО КИФ (Казанский институт фотоматериалов) при модернизации эксплуатируемых плоскощелевых насадок экструдера для отлива полиэтилен-тетрафтолановой (ПЭТФ) основы.

Разработанные методы расчета и программы для РС - совместимых компьютеров внедрены в АО Казаньоргсинтез.

### **Достоверность полученных данных**

Достоверность полученных экспериментальных данных по измерениям скорости миграции и контактных углов обеспечивалась применением аттестованных измерительных средств и апробированных методик измерения и обработки данных, анализом точности измерений, повторяемостью результатов.

Достоверность теоретических результатов гарантируется применением современных методов математического моделирования, базирующихся на общих законах сохранения, использованием теории подобия, апробированных аналитических и численных методов решения, обоснованностью используемых допущений.

Достоверность полученных результатов подтверждается путем сравнения полученных теоретических результатов с известными экспериментальными данными и с результатами расчетов других авторов.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

Математическая модель термокапиллярной миграции капель жидкости на неравномерно нагретой поверхности, экспериментальные методы исследования течений вблизи линии трехфазного контакта. Результаты экспериментального исследования процесса термокапиллярной миграции капель на неизотермических поверхностях. Математическая модель истечения струи неньютоновских жидкостей из формообразующих насадок, учитывающая линию трехфазного контакта. Результаты численного расчета. Результаты исследования влияния термокапиллярной конвекции на устойчивость течения струи на выходе из формообразующей головки экструдера.

### **Апробация работы**

Основные результаты доложены на научно-технических конференциях, в т.ч. на:

- отчетных научно-технических конференциях КХТИ-КГТУ (г.Казань, 1973-1999);
- Минском международном форуме по тепло- массообмену (г.Минск, 1988, 1992);
- European vacuum conference EVC& National vacuum congress AIV XI (Italy, Trieste, 1990);
- Всесоюзном съезде механиков (г. Москва, 1991);
- 2<sup>nd</sup> International Conference on Multiphase Flows (Japan, Kyoto, 1995);

■ 19<sup>th</sup> International Congress on Theoretical and Applied Mechanics (Japan, Kyoto, 1996);

■ International Symposium on MHD Flows and Turbulence (Israel, Jerusalem, 1996);

■ 2<sup>nd</sup> International Workshop «Transport phenomena in Two- Phase Flows» (Bulgaria, 1997);

■ 20<sup>th</sup> International Conference on Multiphase Flows (France, Lyon, 1998);

■ 3<sup>rd</sup> International Workshop «Transport phenomena in Two- Phase Flows» (Bulgaria, 1998);

■ 3<sup>rd</sup> European Coating Symposium. Advances in Coating and Drying of Thin Films (Germany, Erlangen, 1999);

■ юбилейной научной конференции КНЦ РАН и АН Татарстана, посвященной 275 годовщине РАН, 1999г.;

■ XX Международной конференции по химической технологии КХТП'99, посвященная памяти академика В.В. Кафарова.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 59 печатных работ, в том числе получено 3 авторских свидетельства.

**Объем работы.** Содержание диссертации изложено на 265 страницах машинописного текста, содержит 28 таблиц, 69 рисунков. Список использованной литературы включает 164 наименования.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения и семи глав, заключения и списка литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

**В главе первой** приводится обзор литературы по теме диссертации, в котором отмечено следующее. Исследования течений как ньютоновских так и неньютоновских жидкостей под действием термокапиллярных сил с подвижными границами и с учетом явлений на движущейся линии трехфазного контакта являются актуальными. Это связывается, с одной стороны, многими нерешенными проблемами математического и физического характера, так и возможностями широкого приложения в химической технологии.

Физические условия, появляющиеся на границе между двумя несмешивающимися жидкостями связаны с тем, что граница раздела фаз является материальной поверхностью. В этом случае математическая формулировка этих условий записывается в виде:

$$\bar{V}^{(+)} \cdot \bar{n} = \bar{V}^{(-)} \cdot \bar{n} = \bar{V} \cdot \bar{n} \quad (1.1)$$

$$\bar{V}^{(+)} \cdot \bar{t} = \bar{V}^{(-)} \cdot \bar{t} \quad (1.2)$$

$$\bar{n} \cdot (\mathbf{T}^{(+)} - \mathbf{T}^{(-)}) = 2\mathbf{k} \cdot \sigma \cdot \bar{n} + \nabla \sigma \quad (1.3)$$

где  $\bar{V}^{(+)}$ ,  $\bar{V}^{(-)}$  и  $\mathbf{T}^{(+)}$ ,  $\mathbf{T}^{(-)}$  - скорости жидкостей и напряжения по разные стороны от межфазной границы;  $\bar{V}$  - скорость перемещения межфазной границы;  $\bar{t}$  - орт касательной к межфазной поверхности;  $\bar{n}$  - нормаль к межфазной поверхности, направленный от области имеющей скорости частиц  $\bar{V}^{(+)}$ ;  $\mathbf{k}$  - кривизна межфазной границы;  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения.

**Во второй главе** рассмотрены условия возникновения поверхностной миграции на неравномерно нагретых рабочих поверхностях паромасляных насосов. Известно, что проникновение рабочей жидкости в откачиваемый объем является одним из главных недостатков масляных диффузионных насосов. Возможными источниками загрязнения рабочих объемов технологических камер являются следующие: 1) обратный поток паров масла из фронта струи; 2) испарение масел с краев сопел; 3) испарение масла со стенки насоса; 4) обратный поток паров масла из зоны кипения; 5) проникновение паров масла из форвакуумного насоса; 6) формирование и миграция капель рабочих жидкостей в направлении откачиваемого объема.

Как можно видеть, одним из механизмов обратного проникновения паров рабочей жидкости является поверхностная миграция. Наш подход к исследованию миграции капель рабочей жидкости в системах вакуумирования основан на том факте, что стенки насоса находятся в неизотермических условиях. Следовательно, как только капля рабочей жидкости попадает на неравномерно нагретую стенку, температурная зависимость поверхностного натяжения капли приводит к термокапиллярной конвекции. Эта конвекция является причиной миграции капли в направлении отрицательного градиента температуры, т.е. в направлении откачиваемого объема.

Задача решена при следующих допущениях: стенка непроницаема; капля тонкая, линия трехфазного контакта, согласно гипотезе Навье, может скользить по твердой стенке. Учитывая тонкость капли и медленность течения, уравнение для профиля движущейся капли в подвижной системе координат  $(\xi, \zeta)$ , связанной с каплей, запишется в виде:

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \tau} - \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \xi} \cdot \mathbf{U} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ \mathbf{H}^2 (\mathbf{H} + \varepsilon) \frac{\partial^3 \mathbf{H}}{\partial \xi^3} \right\} = \frac{\mathbf{Ca}}{\theta_0^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ \mathbf{H} \left( \frac{3}{2} \mathbf{H} + \varepsilon \right) \right], \quad (2.1)$$

где  $\mathbf{H}(\xi, \tau) = \mathbf{h}(\mathbf{x}, t) / (\mathbf{a}_0 \cdot \theta_0)$ ;  $\mathbf{a}_0$  - радиус капли;  $\varepsilon = 3\varpi_0 / (\mathbf{a}_0 \theta_0)$ ;

$\mathbf{Ca} = \frac{\partial \sigma}{\partial \mathbf{T}} \cdot \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \xi} \cdot \frac{\mathbf{a}_0}{\sigma}$ ;  $\varpi_0$  - коэффициент скольжения;  $\tau$  - безразмерное время.

Соответствующие граничные условия имеют вид:

$$\mathbf{H}(\pm 1, \tau) = 0 \quad (2.2)$$

$$-\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \xi} \bigg|_{\xi \rightarrow 1} = \frac{\theta_a}{\theta_0} \quad (2.3)$$

$$\int_{-1}^1 \mathbf{H}(\xi, \tau) d\xi = \frac{2}{3} \quad (2.4)$$

При решении задачи (2.1) - (2.4) использовался *метод сращивания асимптотических разложений*.

Из условия сращивания разложений профиля капли во внешней (центральной) и промежуточной (примыкающей к окрестности линии трехфазного контакта) областей получены выражения для динамического контактного угла и скорости миграции капли.

Выражение для «действительного контактного угла» (гистерезисного) имеет следующий вид:

$$\theta_a^3 = \theta_0^3 \cdot \left[ 1 + \frac{9}{2\theta_0^2} \cdot |\mathbf{Ca}_{кр.}| \right]; \quad (2.5)$$

где  $\mathbf{Ca}_{кр.} = \frac{\partial \sigma}{\partial \mathbf{T}} \cdot \left| \frac{d\mathbf{T}}{d\xi} \right|_{кр.} \cdot \frac{\mathbf{a}_0}{\sigma}$ .

Для рассматриваемой системы жидкость - поверхность, характеризующейся равновесным краевым углом  $\theta_0$ , величина  $\theta_*$  соответствует началу движения жидкости, т.е. при достижении контактным углом величины  $\theta_*$  теряется устойчивость состояния покоя.  $Ca_{кр}$  - критический параметр, при котором капля начинает двигаться.

Выражение для скорости перемещения капли  $U$  записывается в виде:

$$U = \frac{\sigma}{\mu} \cdot \frac{\theta_0}{2 \ln \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{a_0 \theta_0}{\lambda} \right)} \cdot (Ca - Ca_{кр}). \quad (2.6)$$

Из полученных выражений очевидны основные факторы, влияющие на возникновение и скорость поверхностной миграции. А именно, перемещение капли на неравномерно нагретой поверхности может происходить только при достижении числом  $Ca$  некоторого критического значения  $Ca_{кр}$ . В дальнейшем, при увеличении  $Ca$  рост скорости  $U$  происходит линейно. Однако, последнее утверждение необходимо подтвердить экспериментально.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований процесса термокапиллярной миграции.

#### *Измерение поверхностного натяжения*

Перемещения жидкости под действием термокапиллярных сил связаны с температурной зависимостью поверхностного натяжения жидкости, данные по которым неполны и отрывочны. В настоящей работе для определения температурной зависимости поверхностного натяжения использовался метод «пузырька».

Оценка погрешностей измерения поверхностного натяжения показала, что она составляет величину порядка 8%.

Результаты измерений по поверхностному натяжению минеральных масел ВМ-1, ВМ-3 совпали с известными данными. Характер зависимости  $\sigma = \sigma(T)$  всех исследованных жидкостей одинаков и показывает, что с понижением температуры поверхностное натяжение повышается. Таким образом, если на свободной поверхности жидкости поддерживается линейное распределение температуры, то на ней возникает градиент поверхностного натяжения  $d\sigma/dx$ , направленный в сторо-



ну понижения температуры. Температурный коэффициент поверхностного натяжения рассмотренных жидкостей примерно одинаков и составляет величину порядка  $10^{-4} \text{ Н / (м} \cdot \text{К)}$ .

### *Измерение контактных углов*

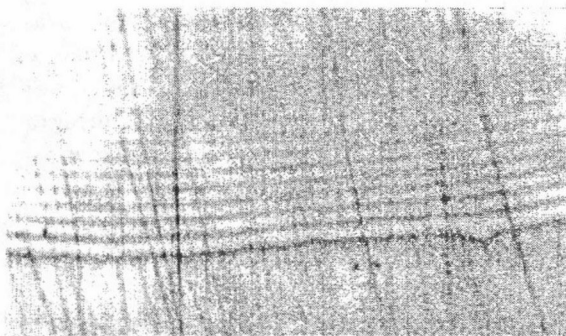
Измерения краевых углов проводились методом интерференции в отраженном свете. При этом использовался лазерный интерферометр, собранный на базе металлографического микроскопа ММУ-3, на предметный столик которого устанавливался нагреватель с размещенным в нем образцом, температура которого контролировалась термодарами. Сущность метода заключается в том, что профиль капли вблизи линии контакта близок к профилю клина.

При освещении клина монохроматическим светом вблизи линии контакта наблюдается интерференционная картина. Если рассматривать интерференционные полосы 1 и 2, то переход от первой полосы ко второй соответствует разности хода на длину волны  $\lambda_e$ , т.е.  $(d_2 - d_1) \cdot n = \lambda_e$ , где  $d_1, d_2$  - высоты, соответствующих полос клина,  $n$  - коэффициент преломления. Промерив расстояние  $l$  между полосами, можно определить контактный угол  $\theta$  по формуле:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\lambda_e}{n \cdot l}; \quad (3.1)$$

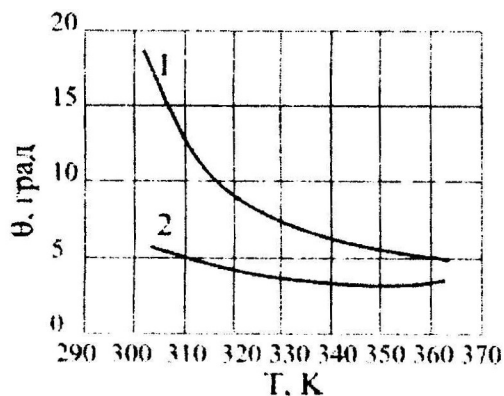
В широком интервале температур для масел ВМ-1, ВМ-3 коэффициент преломления  $n$  совпал с известными данными.

На *рис. 3.1.* приведена интерферограмма для масла ВМ-3 на стали 20 при температуре  $T = 360 \text{ К}$ .

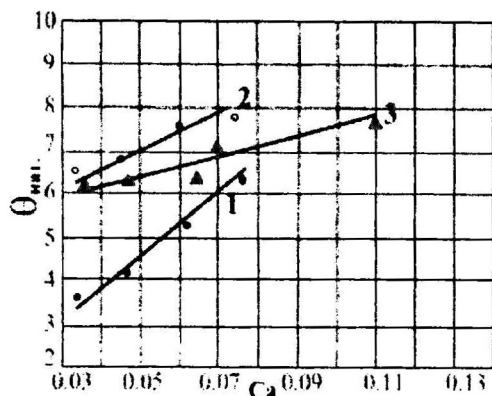


*Рис 3.1. Интерференционная картина вблизи линии контакта*

Некоторые результаты по измерению равновесных и динамических краевых углов при различных температурах приведены на *рис 3.2-3.3*.



**Рис 3.2** Зависимость контактного угла от температуры на подложке из стали 12X18H10T: 1 - VM-1; 2 - VM-3



**Рис.3.3** Динамический контактный угол на Ст-201-VM-3; 2-VM-1; 3-ФМ-1

### Экспериментальное исследование скорости миграции

Эксперименты на горизонтальной поверхности проводились на установке, схема которой представлена на *рис. 3.4*. На предметный столик

Исходя из сделанных наблюдений, можно сделать следующие выводы, касающиеся механизма перемещения видимого фронта движения капли в случае лиофильности исследуемой системы ( $\theta_0 < 20^\circ$ ): 1) течение переднего фронта капли является скользящим; 2) впереди движущегося фронта образуется жидкий «носик», имеющий угол контакта  $\theta_A$ , близкий к равновесному значению  $\theta_0$ ;

3) течение переднего фронта «носика» связано с тем, что жидкость сначала смачивает твердую границу тонкой пленкой, образование которой связано с оттоком жидкости вблизи линии контакта вследствие шероховатости подложки.

металлографического микроскопа устанавливается теплоизолированная текстолитовая подложка. На одном конце подложки



**Рис. 3.4. Экспериментальная установка для исследования скорости миграции на горизонтальной поверхности**

закреплялась медная трубка через которую прокачивалась вода, термостатированная в водоохладителе. На другом конце закреплялся на медном стержне нагреватель, питаемый от источника тока. На участке подложки длиной 18 мм обеспечивалось одномерное, с постоянным градиентом, температурное поле, которое контролировалось термопарами.

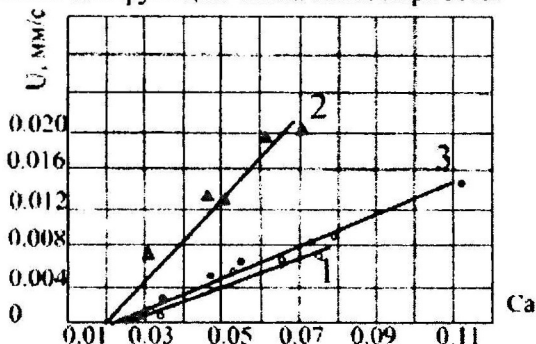
На этот участок наносилась капля исследуемой жидкости. На первом этапе исследований визуализировалась картина термокапиллярной конвекции на свободной поверхности капли жидкости с помощью индикаторных веществ - алюминиевой пудры и частиц пыли. Анализ визуальных наблюдений показал, что: 1) наблюдаемое перемещение частиц пыли свидетельствовало о наличии термокапиллярной конвекции; 2) скорость движения пылинки на свободной поверхности сопоставима со скоростью миграции самой капли; 3) при приближении частиц пыли к движущейся линии трехфазного контакта скорость частиц замедлялась; 4) индикаторные частицы практически никогда не достигали линии контакта; 5) во всех случаях наблюдался «скрепперный эффект», когда передний фронт движущейся жидкости толкает перед собой попавшие на подложку частицы пыли или частицы предварительно не удаленных фрагментов загрязнений.

Результаты наблюдений говорят о сложном характере течений вблизи контактной линии. Физическая модель взаимодействия фаз на линии контакта, по-видимому, соответствует процессам выдавливания частиц

прилипших к подложке жидкими частицами, находящимися на переднем фронте натекающей капли.

В дальнейшем проводились непосредственно измерения скоростей миграции капель на горизонтальных и вертикальных поверхностях, как сухих так и замасляных.

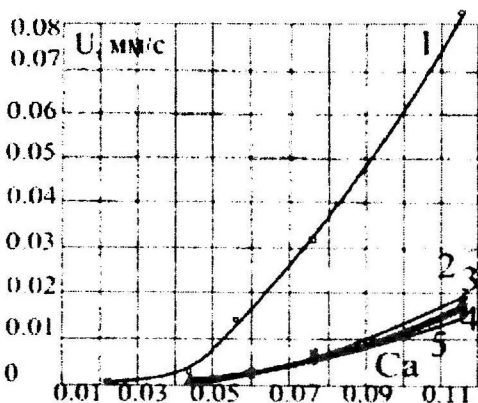
Полученные результаты по скорости перемещения капли представлены как функции числа капиллярности.



**Рис.3.5. Скорость миграции на горизонтальной поверхности из 12X18H10T: 1- ФМ-1; 2- ВМ-3; 3-ВМ-1**

Таким образом, миграция начинается при достижении контактного угла натекания некоторого гистерезисного значения  $\theta_*$ , что соответствует установлению некоторого критического градиента температуры вдоль подложки. В дальнейшем скорость миграции возрастает пропорционально росту надкритичности  $(Ca - Ca_{кр})$ .

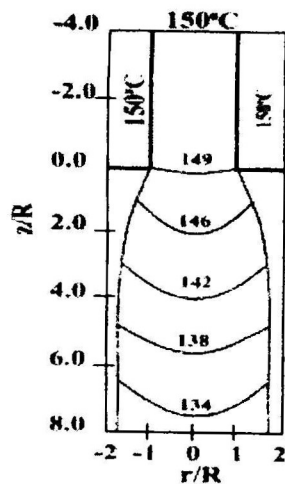
На рис.3.5 - 3.6 приведены некоторые характерные зависимости скорости миграции от числа капиллярности  $Ca$ . Из рисунков следует, что скорость миграции капли в зависимости от числа  $Ca$  близка к линейной, что соответствует теоретической зависимости (2.6).



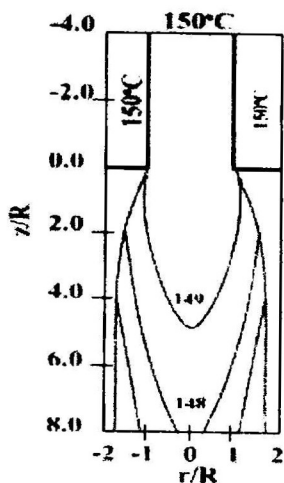
**Рис.3.6 Скорость миграции масла ВМ-3 на вертикальной поверхности из стали 20**

**В четвертой** главе исследуется влияние температурной зависимости вязкости и реологических свойств жидкости на процесс формирования струи в окрестности выходного сечения капилляра.

Вследствие непосредственной близости линии трехфазного контакта и сильного влияния аномалии вязкости, учет температурной зависимости вязкости не вносит существенных изменений в некоторые основные характеристики струи, такие как распределение напряжений вблизи выходного отверстия капилляра. Это справедливо по крайней мере, на расстоянии нескольких диаметров капилляра при  $\dot{\gamma} > 1 \text{ сек}^{-1}$ . Но именно здесь происходит полная перестройка течения сопровождаемая резкими изменениями напряжений и давления. Следовательно, на этом расстоянии, с некоторой потерей строгости, при исследовании степени разбухания струи можно не учитывать температурную зависимость вязкости полимерной жидкости. На рис.4.1 приведены некоторые результаты численного моделирования процесса неизотермической экструзии расплава полиэтилена низкой плотности LDPE методом конечных элементов для капилляра радиуса 0.15 см (*Barakos G., Mitsoulis E. Non-isothermal viscoelastic simulations of extrusion through dies and prediction of the bending phenomenon. // J. non-Newtonian Fluid Mech. - 1996- v.62- p.55-79*). Существующие литературные данные, связанные с математическим моделированием процесса экструзии расплавов полимеров, а также полученные автором экспериментальные данные для полиэтилена низкой плотности, показывают, что для капилляров диаметром более 1 мм и при скорости экструзии  $\dot{\gamma} \geq 10 \text{ сек}^{-1}$  длина жидкой части струи достигает величины от десяти до нескольких десятков диаметров капилляра в зависимости от значения внутреннего диаметра капилляра и температуры экструзии. Данные экспериментальных наблюдений длины жидкой части струи расплава полиэтилена LDPE при различных сдвиговых скоростях экструзии  $\dot{\gamma}$  и для разных диаметров капилляров при температуре экструзии равной  $T = 150^\circ\text{C}$  приведены на рис. 4.2. При реальных скоростях сдвига  $\dot{\gamma} \sim 10^2 \div 10^3 \text{ сек}^{-1}$  длина жидкой части струи может достигать еще больших значений.

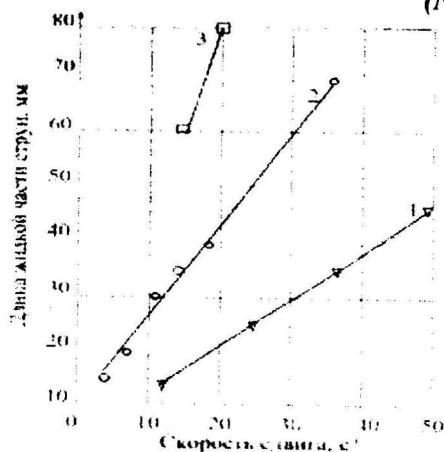


$$\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$$



$$\dot{\gamma} = 10 \text{ s}^{-1}$$

**Рис. 4.1** Изотермы при выдавливании расплава LDPE с различными скоростями сдвига и с конвективным охлаждением ( $Nu=0.023$ )



**Рис. 4.2** Зависимость длины жидкой части струи от скорости сдвига для различных капилляров; 1 -  $d=1 \text{ мм}$ ; 2 -  $d=1,5 \text{ мм}$ ; 3 -  $d=2 \text{ мм}$

Таким образом, при моделировании течения струй полимерных жидкостей вблизи выходного сечения капилляра нельзя не учитывать тот факт, что на распределение напряжений значительное влияние оказывает линия трехфазного контакта, а жидкости являются неньютоновскими и обладают сильной аномалией вязкости и ярко выраженными релаксационными эффектами.

**Пятая и шестая главы** посвящены исследованию влияния линии трехфазного контакта и неньютоновских свойств полимерных жидкостей на процесс формообразования экструдата. Считается, что втекающая в канал жидкость имеет полностью развитый профиль. На твердых границах насадки использованы граничные условия прилипания. На свободной поверхности касательные напряжения равны нулю, нормальные напряжения сбалансированы капиллярным давлением, а нормальная компонента скорости равна нулю, что соответствует условию непротекания. Граничные условия симметрии приняты на центральной оси струи. В качестве реологической модели использовались модель Ньютона, модель псевдопластичной жидкости и верхнеконвективная модель упруговязкой жидкости Максвелла.

*Псевдопластическая жидкость.* Для псевдопластиков напряжения записываются аналогично ньютоновской жидкости (в связи с этим многие авторы относят эту модель к классу нелинейно-вязких или обобщенных ньютоновских жидкостей)

$$\begin{aligned}\tau_{rr} &= 2\mu \frac{\partial V_r}{\partial r}, & \tau_{\theta\theta} &= 2\mu \frac{V_r}{r}, & \tau_{zz} &= 2\mu \frac{\partial V_z}{\partial z}, \\ \tau_{zr} &= \mu \cdot \left( \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right).\end{aligned}\quad (5.1)$$

где

$$\mu = \left| \frac{1}{2} \Pi \right|^{(n-1)/2}, \quad \Pi = \text{tr}(\mathbf{D}^2).$$

*Вязкоупругая жидкость*

В качестве модели вязкоупругой жидкости выбрана верхняя конвективная модель Максвелла (UCM).

$$\overset{\vee}{\tau} + \tau = \mu \cdot \mathbf{D}, \quad (5.2)$$

где  $\lambda$  – постоянное время релаксации;  $\mathbf{D}$  – тензор скоростей деформаций.

Символ  $\overset{\vee}{\tau}$  над тензором напряжений обозначает верхнюю конвективную производную. В системе цилиндрических координат уравнение состояния UCM запишется в виде:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\lambda V_z \tau_{zz}) + \frac{\partial}{\partial r}(\lambda V_r \tau_{rz}) = 2\mu \frac{\partial V_z}{\partial z} - \left(1 - 2\lambda \frac{\partial V_z}{\partial z}\right) \tau_{zz} + 2\lambda \frac{\partial V_z}{\partial r} \tau_{rz} \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\lambda V_z \tau_{rz}) + \frac{\partial}{\partial r}(\lambda V_r \tau_{rr}) = 2\mu \frac{\partial V_r}{\partial r} - \left(1 - 2\lambda \frac{\partial V_r}{\partial r}\right) \tau_{rr} + 2\lambda \frac{\partial V_r}{\partial z} \tau_{rz} \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\lambda V_z \tau_{rz}) + \frac{\partial}{\partial r}(\lambda V_r \tau_{rz}) = \mu \frac{\partial V_z}{\partial z} - \left(\frac{\partial V_z}{\partial z} \frac{\partial V_z}{\partial r}\right) \tau_{rz} + \lambda \frac{\partial V_r}{\partial z} \tau_{zz} + \lambda \frac{\partial V_z}{\partial r} \tau_{rr} \quad (5.5)$$

### Метод решения

Система координат  $(r, z)$  трансформировалась в систему координат  $(\zeta, \eta)$  с учетом соотношений:  $\zeta = z, \eta = r/R(z)$ , где  $R(z)$  - текущий радиус струи.

Использование этого преобразования переводит физическую область течения струи в расчетную прямоугольную область.

Расчеты проводились *методом контрольных объемов* с использованием модифицированного алгоритма *SIMPLER*. Положение свободной поверхности заранее не известно и определялось итеративно. При написании источниковых членов была применена схема расщепления на напряжений, на вязкоупругую и вязкую части. Здесь  $\tau'$  обозначена вязкоупругая часть тензора напряжений:

$$\begin{aligned} \tau'_{zz} &= \tau_{zz} - 2\mu \frac{\partial V_z}{\partial \zeta}; & \tau'_{rr} &= \tau_{rr} - \frac{2\mu}{R} \frac{\partial V_r}{\partial \eta}; \\ \tau'_{rz} &= \tau_{rz} - \mu \left( \frac{1}{R} \frac{\partial V_z}{\partial \eta} + \frac{\partial V_r}{\partial \zeta} \right). \end{aligned} \quad (5.6)$$

Эта процедура позволяет записать уравнения движения в обобщенном виде, удобном для применения алгоритма *SIMPLER*.

Вся расчетная область делится на контрольные объемы. Узловые точки располагаются в геометрических центрах этих контрольных объемов.

Узловые точки для давления расположены в центрах основной сетки.

Для аксиальной и радиальной компонент скорости применена шахматная сетка. Сетка для аксиальной компоненты скорости сдвинута вправо, и узловые точки лежат на правых гранях контрольных объемов для давления. Сетка для радиальной компоненты скорости сдвинута вверх.



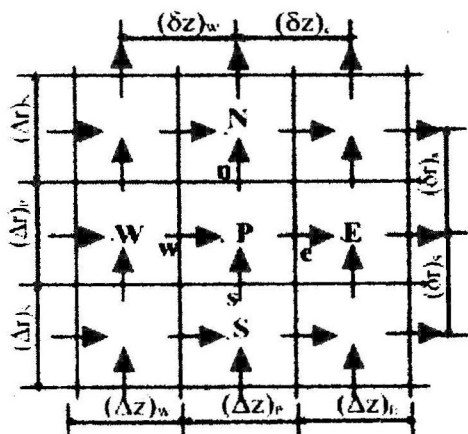


Рис.5.1. Расположение решетки и контрольных объемов

и узловые точки лежат на верхних гранях контрольных объемов для давления (рис.5.1). Узловая точка основного контрольного объема, на котором производится интегрирование, обозначена Р; узловая точка контрольного объема, расположенного справа обозначена буквой Е; левого – W; верхнего – N; нижнего – S. Соответствующие границы контрольного объема – e, w, n, s.

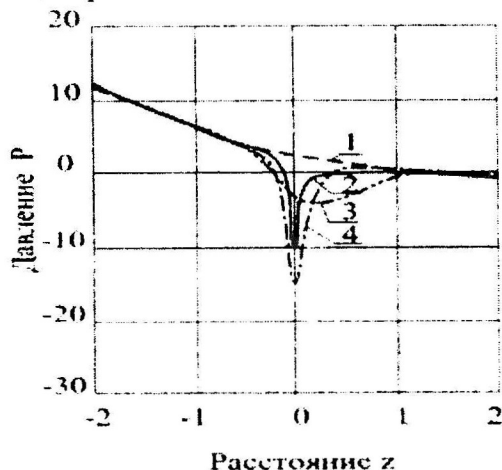


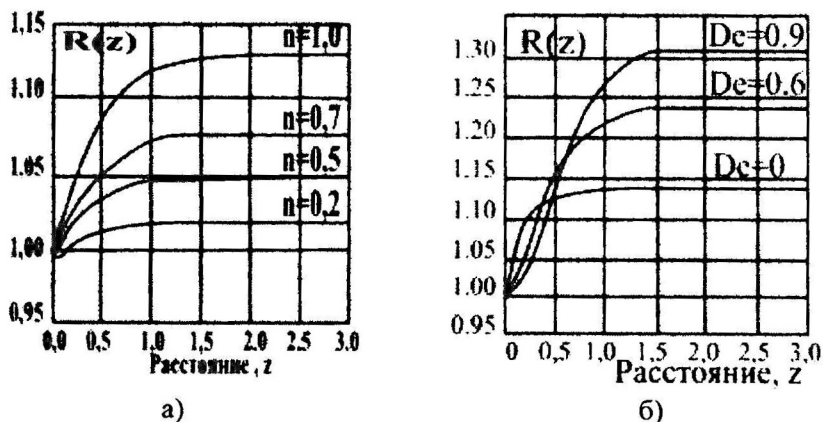
Рис. 5.2 Профиль давления, течение осесимметричное;

1- на оси симметрии; 2 - на поверхности в случае  $p = 0.35$  (без скольжения); 3-на поверхности в случае  $p = 0.35$  (с учетом скольжения); 4 на поверхности в случае  $p = 1$  (ньютоновская жидкость)

На рис. 5.2 представлен профиль давления вдоль оси симметрии и на поверхности ( $z=0$  соответствует выходному сечению капилляра). На рисунке видно наличие скачка давления на выходе из насадки экструдера, однако учет эффекта пристенного проскальзывания существенно снижает амплитуду пульсации давления на выходе из формообразующей насадки. На практике, из-за резкого падения давления, могут создаваться условия для образования пустот в изделиях.

В работе также исследовалось явление разбухания

струи на выходе из формообразующей насадки. Результаты исследования приведены на *рис. 5.3*. Из *рис. 5.3* следует, что в случае степенной жидкости, при отклонении от ньютоновского поведения (с уменьшением величины  $n$ ) расширение струи уменьшается. В случае же упруговязкой жидкости наблюдается прямо противоположное поведение. С увеличением числа Дебори расширение струи увеличивается и при  $De=0.9$  оно составляет  $\approx 30\%$ , что значительно превосходит расширение струи ньютоновской жидкости.

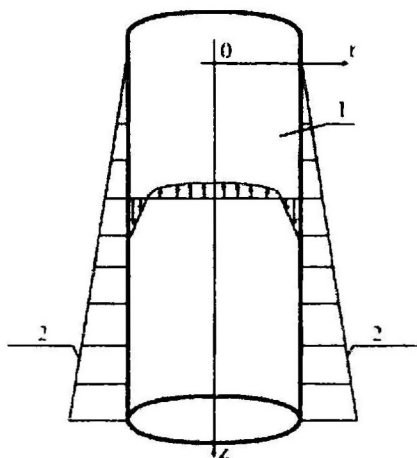


**Рис.5.3 Профиль свободной поверхности струи в зависимости от неньютоновских свойств жидкости**

**Седьмая глава** посвящена устойчивости стационарного течения неизотермической струи относительно малых возмущений. Считается, что свойства жидкости остаются постоянными за исключением коэффициента поверхностного натяжения. Влиянием зависимости вязкости от температуры пренебрегается в соответствии со следующими предположениями: 1) температура струи не достигает значения при которой происходят фазовые превращения (что является существенным ограничением для расплавов полимеров); 2) термокапиллярная конвекция развивается в тонком слое вблизи свободной поверхности струи. Также предполагается, что струя находится на достаточном удалении от линии трехфазного контакта. В настоящее время считается, что механизм разрыва стационарной струи вязкой жидкости заключается в том, что по какой либо внешней причине возникает капиллярная волна, распро-

страняющаяся вдоль оси струи и способная привести к искажениям формы струи и даже к ее разрушению.

Расчетная схема термокапиллярного течения в струе при постоянном отрицательном градиенте температуры  $A = -dT/dz$  приведена на **рис. 7.1**. Исследование на устойчивость предполагает запись всех искомых функций  $U, V, W, P, T, R$  в виде суммы стационарного состояния и возмущенных величин. Здесь  $U, V, W$  - компоненты скорости,  $P$  - отклонение давления от гидростатического значения,  $T$  - отклонение температуры,  $R$  - радиус струи. В соответствии с этим, исследована устойчивость основного термокапиллярного движения к малым возмущениям. Возмущения представлены в виде «нормальных мод» и записаны следующим образом:  $\Phi(r, z) = \bar{\Phi}(r) \exp(i(\alpha z + \beta \theta \cdot s \cdot t))$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  - аксиальные и азимутальные волновые числа, декремент возмущения  $s = s_r + i s_i$ . Затухание или нарастание возмущений определяется знаком мнимой части декремента возмущений.



**Рис. 7.1** Расчетная схема термокапиллярного течения в струе

Уравнения относительно амплитуд возмущений запишется в виде:

$$\left\{ DD_1 - \alpha^2 - \frac{\beta^2}{r^2} - i\alpha \operatorname{Re} W_0(r) + i \cdot \operatorname{Re}_s^{1/2} s \right\} \bar{U} - \frac{2i\beta}{r^2} \cdot \bar{V} = \operatorname{Re}_s^{1/2} \cdot D\bar{P}; \quad (7.1)$$

$$\left\{ \mathbf{D}\mathbf{D}_1 - \alpha^2 - \frac{\beta^2}{r^2} - i\alpha \operatorname{Re} \mathbf{W}_0(r) + i \cdot \operatorname{Re}_s^{1/2} s \right\} \bar{\mathbf{V}} + \frac{2i\beta}{r^2} \bar{\mathbf{U}} = \frac{i\beta \operatorname{Re}_s^{1/2}}{r} \cdot \bar{\mathbf{P}}; \quad (7.2)$$

$$\left\{ \mathbf{D}_1 \mathbf{D} - \alpha^2 - \frac{\beta^2}{r^2} - i\alpha \operatorname{Re} \mathbf{W}_0(r) + i \cdot \operatorname{Re}_s^{1/2} s \right\} \bar{\mathbf{W}} - \operatorname{Re} \mathbf{W}_0'(r) \cdot \bar{\mathbf{U}} =$$

$$= i\alpha \cdot \operatorname{Re}_s^{1/2} \cdot \bar{\mathbf{P}}$$

$$\left\{ \mathbf{D}_1 \mathbf{D} - \alpha^2 - \frac{\beta^2}{r^2} - i\alpha \operatorname{Pr} \operatorname{Re} \mathbf{W}_0(r) + \operatorname{Pr} \cdot \operatorname{Re}_s^{1/2} s \right\} \bar{\mathbf{T}} = ; \quad (7.4)$$

$$= \operatorname{Pr}^2 \operatorname{Re}_s^{1/2} \operatorname{Re} \mathbf{T}_0'(r) \bar{\mathbf{U}} - \operatorname{Pr} \cdot \operatorname{Re}_s^{1/2} \cdot \bar{\mathbf{W}}$$

$$\mathbf{D}_1 \bar{\mathbf{U}} + \frac{i\beta}{r} \bar{\mathbf{V}} + i\alpha \bar{\mathbf{W}} = 0; \quad (7.5)$$

Граничные условия на свободной поверхности запишутся в виде:

а) кинематическое условие

$$\bar{\mathbf{U}}(1) + \left[ i s - i\alpha \operatorname{Re}_s^{-1/2} \operatorname{Re} \mathbf{W}(1) \right] \bar{\mathbf{R}} = 0; \quad (7.6)$$

б) баланс касательных напряжений

$$\mathbf{D}\bar{\mathbf{V}}(1) - \bar{\mathbf{V}}(1) + i\beta \bar{\mathbf{U}}(1) + i\beta \operatorname{Re}_s^{-1/2} \operatorname{Re} \bar{\mathbf{T}}(1) = 0; \quad (7.7)$$

$$\mathbf{D}\bar{\mathbf{W}}(1) + i\alpha \bar{\mathbf{U}}(1) + \operatorname{Re}_s^{-1/2} \operatorname{Re} (i\alpha \bar{\mathbf{T}}(1) + \bar{\mathbf{R}}) = 0$$

с) баланс нормальных напряжений

$$-\bar{\mathbf{P}}(1) + 2\operatorname{Re}_s^{-1/2} \mathbf{D}\bar{\mathbf{U}}(1) - (1 - \alpha^2 - \beta^2) \bar{\mathbf{R}} - \operatorname{Re}_s^{-1/2} \operatorname{Re} (2i\alpha \bar{\mathbf{R}} + \bar{\mathbf{T}}(1)) = 0 \quad (7.8)$$

д) условие конвективной теплоотдачи

$$\mathbf{D}\bar{\mathbf{T}}(1) + \operatorname{Bi}_0 \cdot \bar{\mathbf{T}}(1) - \left[ \frac{1}{4} \operatorname{Pr} \cdot \operatorname{Re} - i\alpha \right] \bar{\mathbf{R}} = 0; \quad (7.9)$$

На осевой линии в общем случае принимается условие ограниченности возмущений

$$|\bar{\mathbf{U}}|, |\bar{\mathbf{V}}|, |\bar{\mathbf{W}}|, |\bar{\mathbf{W}}|, |\bar{\mathbf{T}}| < \infty \quad \text{при } \mathbf{r} = 0; \quad (7.10)$$

где  $\mathbf{D} \equiv \frac{d}{dr}; \quad \mathbf{D}_1 \equiv \frac{d}{dr} + \frac{1}{r}.$

В случае осесимметрических возмущений на осевой линии сле-

дует ставить условия симметрии.

Знак штриха в уравнениях (7.1) - (7.10) означает взятие производной. Краевая задача (7.1) - (7.10) является характеристической. Это означает, что нетривиальное решение существует лишь при определенных значениях параметра  $s$ . Эти значения декремента  $s$  находятся как собственные числа краевой задачи (7.1) - (7.10).

В задачу входят следующие безразмерные параметры:

$Re = \frac{\rho d W^*}{\mu}$  число Рейнольдса для термокапиллярной конвекции;

$Re_s = \frac{\rho d \sigma_0}{\mu^2}$  число Рейнольдса изотермических возмущений;

$Pr = \frac{\nu}{k_\lambda}$  число Прандтля;  $Bio = \frac{k_\alpha d}{k_\lambda}$  число Био, характеризующее

теплоотдачу со стороны жидкости в окружающий газ.

Случай неизотермической задачи, когда число Био ограничено. В этом случае решение задачи ( $Bi=0.02$ ) приводит к результатам, представленным на рис. 7.2.

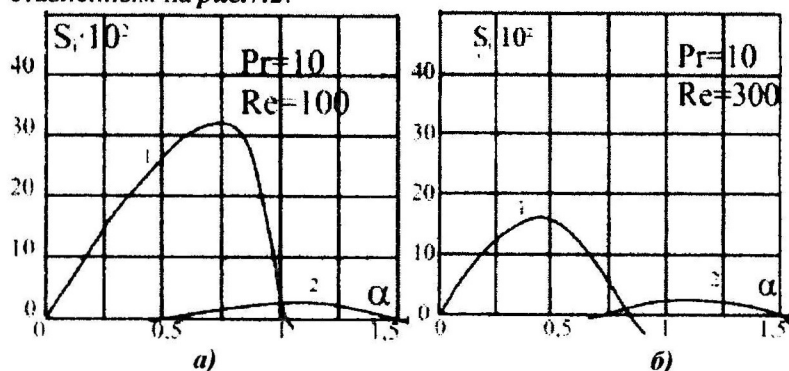


Рис. 7.2 Зависимость положительного значения декремента  $S_i$  от волнового числа

Из этих рисунков, совершенно однозначно можно сделать вывод о том, что с ростом величины термокапиллярного числа Рейнольдса в спектре декрементов возмущений образуется дополнительная ветвь (2), отсутствующая в спектре декрементов возмущений при  $Re \rightarrow 0$  и

приводящая к дестабилизации струи при волновых числах  $\alpha > 1$ . То есть, увеличение числа Рейнольдса термокапиллярной конвекции, в отличие от известных результатов при  $Bio \rightarrow \infty$ , не приводит к подавлению капиллярного механизма неустойчивости струй. Иначе говоря термокапиллярная конвекция при малых числах Био не подавляет длинноволновые возмущения, приводящие к потере устойчивости в интервале волновых чисел ( $0 < \alpha < 1$ ).

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВООДЫ**

В результате проведенных систематических исследований показано, что температурная неоднородность межфазной границы, приводящая к развитию термокапиллярной конвекции, позволяет объединить различные процессы в рамках единой модели, объяснить многие экспериментальные факты, а также по новому взглянуть на многие процессы происходящие в аппаратах химической технологии.

При моделировании процесса поверхностной миграции установлено, что в результате конвекции в капле возникает продольный градиент давления направленный вдоль твердой неравномерно нагретой поверхности. Этот градиент приводит к увеличению контактного угла вплоть до такой величины при которой капля начинает перемещаться в сторону «холодного» конца подложки. Таким образом теряется устойчивость статического состояния равновесия.

В соответствии с этим установлены закономерности термокапиллярной миграции вакуумных рабочих жидкостей. Показано, что миграция начинается при некотором критическом значении числа капиллярности, соответствующем критическому значению градиента температуры. Дальнейший рост скорости миграции связан с надкритичностью линейно. Эксперимент на вакуумных рабочих жидкостях подтвердили теоретические результаты. Полученные результаты позволяют с новых позиций подойти к пониманию процессов миграции, управлять перемещением капель и пленок.

Проведено моделирование установившегося течения неньютоновской жидкости на выходе из формообразующей насадки экструдера. Исследовано влияние аномалии вязкости на гидродинамическую картину вблизи выходного сечения капилляра, а также влияние эффекта пристенного проскальзывания на скачок давления в окрестности линии трехфазного контакта. Получено, что из-за резкой смены граничных условий в области выхода из насадки наблюдаются большие градиенты

напряжений и давления, решающим образом влияющие на процесс формирования струи жидкости на выходе из капилляра. На практике, из-за резкого падения давления, может происходить вскипание растворителя в полимерных растворах при достижении давления растворителя в полимерной жидкости ниже давления его насыщенных паров что ведет к образованию каверн и пузырьков в изделиях. Однако, учет эффекта пристенного проскальзывания, характерного для неньютоновских жидкостей и проявляющегося при достижении скорости сдвига  $\dot{\gamma} \geq 5 \text{ сек}^{-1}$ , существенно (в несколько раз) может уменьшить амплитуду скачка давления в выходном сечении капилляра.

Показано влияние термокапиллярного течения на устойчивость струи к малым возмущениям. С учетом ограничений, связанных с неучетом температурной зависимостью вязкости, проведено моделирование случая устойчивости неизотермических струй, подверженных влиянию термокапиллярного эффекта. В этом случае число Био ограничено. Показано, что термокапиллярная конвекция при малых числах Био не подавляет длинноволновые возмущения, приводящие к потере устойчивости в случае малых волновых чисел возмущений ( $0 < \alpha < 1$ ). Иначе говоря, вопреки ожиданиям, термокапиллярная конвекция в неизотермическом случае не стабилизирует жидкую струю.

Полученные результаты численного моделирования исследуемых процессов согласуются с имеющимися экспериментальными данными и данными численных экспериментов других авторов.

Результаты исследований использованы на предприятиях химической и нефтехимической промышленности при исследовании поверхностной миграции в вакуумных паромасляных насосах и создании антимиграционных барьеров (АО «Вакууммаш») и модернизации плоскочелевых насадок для отлива ПЭТФ основы производства фотоматериалов (АО «КИФ»).

#### **Основные обозначения, принятые в работе**

$\rho$  – плотность;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $g$  – ускорение свободного падения;  $T$  – температура;  $U, V$  – компоненты скорости;  $P$  – давление;  $\Theta_0$  – равновесный контактный угол;  $\Theta_r$  – угол оттекания;  $\Theta_a$  – угол натекания;  $\sigma_0$  – коэффициент среднего поверхностного натяжения;  $\nu$  – кинематическая вязкость;  $k_\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $k_\lambda$  – коэф-

фициент теплопроводности;  $k_a$  - коэффициент температуропроводности;

### **Основное содержание диссертации изложено**

#### **В статьях**

1. Тазюков Ф.Х., Гарифуллин Ф.А. Тепловая неустойчивость слоя упруго-вязкой жидкости с учетом термокапиллярных сил //Тепло и массообмен в хим. технологии. Сб.статей; КХТИ, Казань. -1977. - С.26-28.
2. Тазюков Ф.Х., Гарифуллин Ф.А., Заппаров Ф.И., Мингалеев Н.З., Норден П.А., Арзамасов В.С. Изучение процесса конвекции упруго-вязкой жидкости.- Казань: КХТИ, 1979.- Деп в ВИНТИ №2684-79.
3. Тазюков Ф.Х., Гарифуллин Ф.А., Заппаров Ф.И., Мингалеев Н.З. Численное исследование конвекции в упруговязкой жидкости.- Казань: КХТИ, 1979.- Деп в ВИНТИ №2685-79.
4. Ф.Х. Тазюков, Ф.А. Гарифуллин, П.А Норден, Ф.И. Заппаров. Экспериментальное изучение теплопереноса через слой растворов полимеров //Тепло- массообмен в хим. Технологии. Сб.статей; КХТИ, - Казань. - вып.8.- 1980.- с. 22-25.
5. Ф.Х. Тазюков, Б.Д. Клигман, Ф.А. Гарифуллин. Сравнение стационарных и динамических характеристик растворов каучуков.- Казань, хим.-технол. ин-т,1980.- Деп. в ЦНИИ ТЭ нефтехим.
6. Тазюков Ф.Х., Гарифуллин Ф.А., Норден П.А. О возможности визуализации гидродинамической картины конвективного течения в горизонтальном слое неньютоновской жидкости при помощи интерферометрического метода // «Тепло- массообмен в хим. технологии». Сб.статей; КХТИ, -Казань.- 1981. - С. 18- 21.
7. Tazioukov F.H., Garifullin F.A., Ernst-Otto Reher. Unter suchung der Ausbildung endlicher Storungen bei der Konvektion einer viskoelastischen Flussigkeit in einer horizontalen schicht //Plast und kautschuk . - Heft 3. - 30 jahr. - 1983. -S. 157-160.
8. Tazioukov F.H., Garifullin F.A., Norden P.A., Mingaleev N.Z., Ernst-Otto Reher. Untersuchung der konvektion in nicht-New tonschen Medien nach dem Interferenzverfahren /Plast und kautschuk.- Heft 2. - 30 jahr. - 1983.- S. 88- 91.
9. Тазюков Ф.Х., Шульман З.П., Гарифуллин Ф.А., Норден П.А. Интерферометрическое исследование конвекции в горизонтальном



слое жидкости //ИФЖ. - т.XLV. - №4. - 1983.- С.577 - 582.

10. Путиловский Ф.Д., Строгонова А.А., Тазюков Ф.Х., Силуянов В.А. Экспериментальное исследование возможностей термокапиллярного механизма миграции //НПО «Казанькомпрессормаш». -Деп. ЦИНТИхимнефтемаш 23.03.87, № 16634- ХН87. - Казань. - 1987.- 12с.
11. Тазюков Ф.Х., Путиловский Ф.Д., Силуянов В.А., Норден П.А. Исследование поверхностной миграции в вакуумных системах // Вопросы атомной науки и техники. /Сер. Общая и ядерная физика.- вып.3(43).- 1988.-С. 45-48.
12. Тазюков Ф.Х., Норден П.А. Решение задачи капельной миграции на горизонтальной неизотермической поверхности //Моделирование нелинейных процессов в механике и теплотехнике. Сб.статей; ИММ КНЦ РАН, Казань, - вып. XXIV.- 1989. С. 86-93.
13. Тазюков Ф.Х., Шайхиев Ф.Г., Габитова А.В. Обтекание частиц неньютоновской жидкостью //Моделирование нелинейных процессов в механике и теплотехнике. Сб.статей; ИММ КНЦ РАН, Казань, вып.XXIV.- 1989, С. 94-102.
14. Карибуллина Ф.Р., Гарифуллин Ф.А., Тазюков Ф.Х. Миграция тонких капель по наклонной поверхности под действием термокапиллярных сил //Тепло- и массообмен в хим. технологии. Сб.статей; Казань.- КХТИ. - 1992.- С.120-127.
15. Тазюков Ф.Х., Карибуллина Ф.Р. Вытягивание жидкой пленки неньютоновской жидкости по вертикальной стенке под действием термокапиллярных сил //Тепло-массообмен в хим. технол. Сб.статей; Казань. - КХТИ. - 1994.
16. Карибуллина Ф.Р., Гарифуллин Ф.А., Тазюков Ф.Х. Вытягивание жидкой пленки неньютоновской жидкости по вертикальной стенке под действием термокапиллярных сил //Тепло- и массообмен в хим. технологии. Сб.статей; Казань.-КХТИ.-1995.-С.25-35.
17. Tazioukov F., Garifoullin F., Norden P., Ossipov P., Karibullina F. Surface Migration of Oil in Vacuum Systems //Vacuum in Forschung und Praxis. -v.8.-N2. - Mai. - 1996. - pp.105-108.
18. Tazioukov F., Garifullin F. Flow Structure in Special Channel Having Step and Obstacle //Fluid Flow Research: Turbulence and Applied MHD /Ed. Herman Branover - Cambridge, Massachusetts. -v. 182. - 1998. -

pp.865-868.

19. Гадельшина Г.А., Тазюков Ф.Х., Гарифуллин Ф.А. Моделирование течения обобщенной ньютоновской и вязкоэластичной жидкостей на выходе из экструдера //Деп. В ВИНТИ №480-ВОО от 24.02.2000.

#### **В трудах конференций и симпозиумов**

1. Путиловский Ф.Д., Тазюков Ф.Х., Силуянов В.А. Динамика контактной линии на горизонтальной неравномерно нагретой поверхности. //Тепло- массообмен ММФ. - Избран. докл. Минск. межд. форум, 24-27 мая, Минск, 1989. - С.107-117.
2. Garifullin F.A., Tazioukov F.H. Thermocapillary convection in coating flow //ММФ-92. -Минск.- т.4. - часть 1. - 1992.
3. Тазюков Ф.Х., Ф.А. Гарифуллин Ф.Г. Шайхиев С.Н. Малышев Влияние реологических характеристик потока жидкости на движение капли по неизотермической поверхности в различных гидродинамических условиях //Тепло- массообмен -ММФ.- Избранные доклады. ММФ-92.-Минск 1992.- С. 161-163.
4. Garifullin F.A., Tazioukov F.H. Coating flow of oil films into account the interaction of three phases //2<sup>th</sup> Int. Conf. On Multiphase flow ICMF95. - Kyoto, Japan 3-7 April. - 1995.
5. Garifullin F.A., Tazioukov F.H. The visualisation of convective flows in a horizontal layer of non-Newtonian fluid //The 19<sup>th</sup> Intern. Congress of Theoretical and Applied Mechanics. - Japan, Kyoto, - August 25-31. - 1996.
6. Тазюков Ф.Х., Карибуллина Ф.Р., Гарифуллин Ф.А. The rising of a thin film on the vertical wall due to thermocapillary force //The 6<sup>th</sup> Intern. Symposium on Gas-Liquid Two-Phase Flows. ASME Summer Meeting, Vancouver, - Canada, Vancouver June, - 1997.
7. Garifullin F.A., Tazioukov F.H. Convective flows in a horizontal layer of non-Newtonian fluid //The 2<sup>th</sup> Pacific Rim Conference on Rheology. - Melbourne, Australia. - July 27-31. - 1997.
8. Тазюков Ф.Х., Карибуллина Ф.Р., Гарифуллин Ф.А. Движение пленки жидкости по неизотермической вертикальной подложке //1 межд. конф. «Модели механики сплошной среды, вычислит. технологии и автоматизир. проектир. в авиа- и машиностр.». - Россия. - Казань. - 21-27 сент.- 1997.

9. Garifoullin F., Tazioukov F., Karibullina F. Experimental Observation of the Droplet-Droplet Interactions due to Marangony effect //3<sup>th</sup> Int. Conf. On Multiphase flow ICMF95. - CD- version. -Lyon, France. -1998.
10. Garifullin F., Tazioukov F., Karibullina F. Coating flow of oil in vacuum systems.//3<sup>rd</sup> European coating symposium «Advances in Coating and Drying of Thin Films».- University of Erlangen - Nuernberg. - Sept. 7-10. - 1999.

#### **В тезисах докладов**

1. Тазюков Ф.Х., Гарифуллин Ф.А. Конечно-амплитудная конвективная неустойчивость в упруговязкой жидкости //Тезисы докл. II Всесоюзной конф. по механике аномальных систем. - Баку. -1977. - С. 54-55.
2. Тазюков Ф.Х., Гарифуллин Ф.А. Один метод решения задачи конвекции упруговязкой жидкости, подогреваемой снизу //Тезисы докл. X Симпозиума по реологии.-Пермь.-1978.
- 3.Тазюков Ф.Х., Заппаров Ф.И., Мингалеев Н.З. Изучение характера возникновения и протекания процессов конвекции в неньютоновских жидкостях //Тезисы докл. XXXII научн. конф. по итогам науч. исследований и внедрение их в производство. - Казань. -1980. - С. 72.
4. Тазюков Ф.Х., Гарифуллин Ф.А., Заппаров Ф.И., Мингалеев Н.З., Норден П.А. Исследование конвекции в горизонтальном слое упруговязкой жидкости //Тезисы докл. VI Всесоюз. конф. по тепло- и массообмену. - Минск. -1980. - С. 7- 14.
5. Тазюков Ф.Х., Гарифуллин Ф.А., Заппаров Ф.И., Мингалеев Н.З. Исследование конвективного теплопереноса в слоях упруго-вязкой жидкости //Тезисы докл. II Всесоюз. конф. по теории мех. переработке полимерных материалов. - Пермь. -1980. - С. 29- 30.
6. Тазюков Ф.Х. Исследование возмущений конечной амплитуды в горизонтальном слое неньютоновской жидкости //Тезисы респ. научно-техн. конф. «Механика сплошных сред». - Наб.Челны. -1982. - С.4.
7. Тазюков Ф.Х., Силуянов В.А., Гринберг Т.Л. Определение температурного коэффициента поверхностного натяжения интерферометрическим методом //Тезисы конф. по вопросам радиоспект., оптики, механики и подземной гидродинамики. - 1986. - С. 54.

8. Тазюков Ф.Х., Силуянов В.А., Шайдуллина Р.М. О перемещении тонкой двумерной капли под действием термокапиллярных сил //Тезисы V Всесоюзной конф. «Физика и техника высокого и сверх-высокого вакуума». - Ленинград. - 1985. - С. 55.
9. Тазюков Ф.Х., Путиловский Ф.Д., Силуянов В.А. О перемещении жидких капель на твердых неизотермических поверхностях //Тезисы докл. II Респ. научно техн. конф. - Наб. Челны. - 1987. - С.53.
10. Ф.Х. Тазюков, Ф.Р. Карибуллина. Исследование перемещения капли по наклонной поверхности вверх //Тезисы V научно-техн. конференции молодых специалистов. Исследование, конструирование и технология изготовления компрессорных машин. - 1988. -С. 40-42.
11. Tazioukov F.H., Putilovskiy F.D., Siluianov V.A. Dynamics of the contact line on the horizontal nonuniformly heated surface //Heat/mass transfer. - MIF Book of Abstracts Submitted by Soviet Authors. - Minsk, 24-27 may 1988. - С. 76.
12. Tazioukov F.H., Siluianov V.A., Karibullina F.R. Surface migration regularities in vacuum systems. // European vacuum conference EVC&National vacuum congress AIV XI. -Trieste (Italy).-May 21-25, 1990. - p.137.
13. Тазюков Ф.Х., Силуянов В.А., Карибуллина Ф.Р. Миграция капли по неизотермической поверхности // 7 Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике. - М. -15-21 авг.1991. - С.183.
14. Tazioukov F.H., Siluianov V.A., Karibullina F.R. Moving and Spreading of Thin Liquid Drops due to Thermocapillary Force // 3rd European Vacuum Conference and Austrian-Hungarian-Yugoslav Fifth Joint Vacuum Conference.-Technische Universitat Wien (Austria).- September 23-27, 1991.
15. Tazioukov F.H., Siluianov V.A., Karibullina F.R. The Influence of Wetting Angles Upon Surface Migration in Vacuum Systems //3rd European Vacuum Conference and Austrian-Hungarian-Yugoslav Fifth Joint Vacuum Conference.-Technische Universitat Wien (Austria).- September 23-27, 1991.
16. Тазюков Ф.Х., Гарифуллин Ф.А. Исследование турбулентной конвекции в аппаратах хим. технологии // Математические методы в химии и хим. технологии.- ММХ-9. Россия.- Тверь.-30 мая-1 июня - 1995. -С.62.

17. Карибуллина Ф.Р., Гарифуллин Ф.А., Тазюков Ф.Х. Моделирование подъема неньютоновской жидкости по вертикальной стенке под действием термокапиллярных сил //Математические методы в химии и химической технологии.- ММХ-9. Россия.- Тверь.-30 мая-1 июня - 1995. - С.60.
18. Garifullin F.A., Tazioukov F.H. Numerical simulation of the ultrafiltration performance //6<sup>th</sup> Int. Conf. Of Energex'96.- China, Biejining. - 17-24 July. - 1996.
19. Garifullin F.A., Tazioukov F.H. Flow structure in special channel having step and obstacle //8<sup>th</sup> Beer Sheva Intern. Seminar on MHD - Flows and turbulence. - Feb 25-29, Jerusalem, Israel. - 1996.
20. Tazioukov F.H., Karibullina F.R., Garifullin F.A. Non-Newtonian fluid film creeping due to thermocapillary force //Workshop Varna'97. - Transport phenomena in two phase flow. - Varna, Bulgaria. - Sept. 12-17. -1997.- pp.20-21.
21. Тазюков Ф.Х., Ибляминов Ф.Ф., Гарифуллин Ф.А., Карибуллина Ф.Р. Течение в каналах между двумя параллельными плоскими пористыми мембранами //I межд. конф. «Модели механики сплошной среды, вычислит. технологии и автоматизир. проектир. в авиа- и машиностр.». - Россия. - Казань. - 21-27 сент. 1997.
22. Тазюков Ф.Х., Гарифуллин Ф.А. Моделирование течений с учетом движущейся границы раздела фаз //V -ая межд. науч. конф., посвящ. 85-летию со дня рождения академика В.В.Кафарова, «Методы кибернетики хим.- тех. процессов» .- Казань. - 1999.
23. Тазюков Ф.Х., Карибуллина Ф.Р., Ибляминов Ф.Ф., Ибляминов Р.Ф. Исследование механизма миграции тонких капель по наклонным неизотермическим поверхностям //XI научно-технический семинар «Внутрикамерные процессы, акустика, диагностика, экология». - Казанский филиал военного артиллерийского университета. - Науч.-иссл. Акустич. Лабор. Им. А.С.Фигурова. - Казань. - 1999.
24. Тазюков Ф.Х., Карибуллина Ф.Р., Ибляминов Р.Ф. Определение профиля тонкой капли, движущейся по неравномерно нагретой наклонной поверхности /XI научно-технический семинар «Внутрикамерные процессы, акустика, диагностика, экология». - Казанский филиал военного артиллерийского университета. - Науч.-иссл. акустич. лабор. им. А.С.Фигурова. - Казань. - 1999.

25. Тазюков Ф.Х. Численное исследование устойчивости струи относительно термических возмущений //Международная научно-техн. конференция. Техничко-экономические проблемы промышленного производства. – Наб.Челны.- 29-30 марта 2000. - С.15-16.

**В научно-технических отчетах**

1. Тазюков Ф.Х., Силуянов В.А. Исследование миграции вакуумных рабочих жидкостей и разработка способов и устройств ее предотвращения //Отчет по теме 2057-83-149.
2. Тазюков Ф.Х., Путиловский Ф.Д. Разработка методики определения величины загрязнения откачиваемого объема рабочей жидкостью бустерного насоса //Отчет по теме 2057-87-002.

**Получены авторские свидетельства**

1. А.с.№1516629 СССР. Охлаждаемая ловушка для паромасляного насоса/ Тазюков Ф.Х., Путиловский Ф.Д., Силуянов В.А.. - 4226291/25-29; Заявлено 08.04.87; Оpubл.23.10.89, Бюл.№39.-2с.: ил.
2. А.с.№1523743 СССР. Способ измерения величины обратного потока паров рабочей жидкости вакуумных насосов/ Тазюков Ф.Х., Путиловский Ф.Д., Силуянов В.А. - - 4310611/25-29; Заявлено 28.09.87; Оpubл.23.11.89, Бюл.№43.-2с.: ил.
3. -А.с.№1560332 СССР. Способ очистки поверхности/ Тазюков Ф.Х., Путиловский Ф.Д., Силуянов В.А.- 4185107/40-12; Заявлено 20.01.87; Оpubл.30.04.90, Бюл.№16.-2с.: ил.

Соискатель



Ф.Х. Тазюков

---

Заказ 195

Тираж 100 экз

---

Офсетная лаборатория КГТУ  
4200156 Казань, ул. К.Маркса, 68



2-00